

# ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОГО РАСТВОРЕНИЯ ОКСИДОВ В ЖЕЛЕЗНОЙ МАТРИЦЕ ПРИ МЕХАНОАКТИВАЦИИ

*Козлов К.А., Сагарадзе В.В., Катаева Н.В.,  
Литвинов А.В., Шабашов В.А.*

Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург  
kozlov@imp.uran.ru

В настоящее время существует множество работ, посвященных созданию новых механически легированных дисперсно-упрочненных оксидами (ДУО) реакторных сталей с улучшенными характеристиками жаропрочности и радиационной стойкости в условиях облучения быстрыми нейтронами при высоких температурах. Традиционное использование в качестве упрочняющих материалов оксидов иттрия с высокой энергией межатомной связи не всегда технологически выгодно и требует весьма долгой по времени (более 30 ч) обработки в шаровых мельницах для предварительного растворения достаточно крупных исходных оксидов в матрице стали. Новый технологический принцип получения жаропрочных реакторных ДУО-сталей [1] основан на использовании в виде кислородсодержащих соединений малоустойчивых оксидов железа, легко распадающихся при сильной деформации в смеси со сплавами, легированными химически активными элементами (иттрием, титаном и др.) При последующем отжиге формируются термостойкие иттрий-титановые наноксиды.

Цель данного исследования – сравнительный анализ интенсивности растворения оксидов  $Y_2O_3$  и  $Fe_2O_3$  в матрице железа при холодной деформации в процессе механического легирования. Для изучения кинетики деформационного растворения различных оксидов в сталях с ОЦК решеткой были проведены модельные эксперименты, основанные на механическом легировании чистого железа как в смеси с исходными оксидами  $Y_2O_3$ , так и с малоустойчивыми оксидами железа.

Первая смесь состояла из порошка железа с размером частиц 100-200 нм и дисперсного порошка оксида иттрия  $Y_2O_3$  в количестве 2 мас.%. Предполагалось, что в процессе помола произойдет полное или частичное растворение первичных частиц оксидов  $Y_2O_3$  с размерами 40-100 нм с последующим выделением упрочняющих вторичных оксидов  $Y_2O_3$  размером 2-5 нм при высокотемпературном отжиге [2]. Состав второй смеси ( $Fe + 1,5 \% Y + 1,35 \% Fe_2O_3$ ) выбран так, чтобы кислород, перешедший в матрицу из оксида железа при деформации, полностью связал растворенные при механолегировании частицы иттрия (1,5 %) в оксид  $Y_2O_3$ . В этом случае носителем кислорода являлся слабоустойчивый

оксид  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , который достаточно хорошо растворяется в матрице  $\alpha\text{-Fe}$  при холодной деформации.

Механосинтез был проведен в планетарной шаровой мельнице Pulverizette-7 в нейтральной среде аргона в течение 2...32 ч. Полученные порошки компактировали в наковальнях Бриджмэна и отжигали при  $1100^\circ\text{C}$ . Фольги исследовали с помощью трансмиссионной электронной микроскопии на микроскопе JEM-2000CX. Распределение оксидов по размерам в различных образцах анализировали с привлечением количественной металлографии, по результатам которой строили соответствующие гистограммы.

Показано, что интенсивность деформационного растворения крупных первичных оксидов  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в  $\alpha$ -железе (и связанное с этим насыщение кислородом  $\alpha$ -матрицы) при обработке в шаровой мельнице до 10 ч в несколько раз выше, чем интенсивность растворения оксидов  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Высокотемпературный отжиг механолегированной смеси «Fe + 1,5%Y + 1,35% $\text{Fe}_2\text{O}_3$ » приводит к выделению 33-60% (от общего числа частиц) вторичных оксидов размером 2-5 нм и только 5-7% вторичных оксидов в механолегированной смеси «Fe + 2% $\text{Y}_2\text{O}_3$ ».

Представленные результаты свидетельствуют о меньшей деформационной устойчивости оксидов железа и большей интенсивности их деформационного растворения в матрице ОЦК железа по сравнению с оксидами иттрия.

Работа выполнена по теме «Структура», поддержана УрО РАН (проект № 09-М-23-2004) и РФФИ (проекты № 10-03-00113 и 11-02-00224).

[1] Сагарадзе В.В., Литвинов А.В., Шабашов В.А. и др. Новый метод механосинтеза ODS-сталей с использованием оксида железа // ФММ. 2006. Т. 101. № 6. С. 618-629.

[2] Ukai S., Harada M. Okada H. et al. Alloyng design of oxide dispersion strengthened ferritic steel for long life FBRs core materials // J.Nucl.Mater. 1993. V. 204. P. 65-73.